

論文 AFRP シートと鋼板のせん断付着性状に関する実験的研究

小崎 大樹^{*1}・栗橋 祐介^{*2}・三上 浩^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨：本研究では、AFRPシートと鋼板の付着性能に及ぼす鋼板表面の処理方法の影響を検討することを目的に、ブラスト処理の有無や処理深さを変化させた鋼板と AFRP シートのせん断付着試験を実施した。また、せん断付着試験の結果を参考にして、緊張接着補強用 AFRP シート定着部にブラスト処理済み鋼板を用いた AFRP シート緊張接着補強工法への適用性を RC 梁を用いて実験的に検討した。その結果、RC 梁において緊張接着補強用 AFRP シート定着部にブラスト処理済み鋼板を用いることにより、緊張接着補強用 AFRP シートの定着を十分に確保できることが明らかになった。

キーワード：鋼板, ブラスト処理, せん断付着試験, RC 梁, AFRP シート緊張接着補強工法

1. はじめに

我が国では、既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の高齢化が維持管理上の問題となっている。この種の構造物の補強工法として、軽量で、かつ高引張強度を有する連続繊維 (FRP) シートが数多く適用されており、最近では、より効率的な補強工法として緊張接着補強工法が提案され、一部で実用化されている。既設 RC 構造物に FRP シート緊張接着補強工法を適用する場合には、その剥離破壊に十分に留意する必要がある。特に、コンクリート表面とシートとの付着が十分である場合においても、その界面に作用するせん断付着応力がコンクリートのせん断強度や引張強度より大きくなるとシートがかぶりコンクリートとともに引き剥がれる場合がある。このような現象は、FRP シートの定着部において生じることが多い (写真-1)。上記の課題を解決するために著者らは、補強対象部位のうち FRP シート定着部に予め鋼板をアンカーボルトなどで固定した後、シートを緊張接着補強する工法を考案した。

一方、鋼板と FRP シートとのせん断付着性能については、炭素繊維製 FRP (以後、CFRP) シートを対象とした研究¹⁾²⁾³⁾は多く見られるものの、アラミド繊維製 FRP (以後、AFRP) シートを対象とした研究は極わずかである。AFRP シートは、CFRP シートに比べて弾性係数が小さく、しなやかで伸び性能に優れる特徴を有していることから、衝撃荷重を受ける構造物の補強や緊張接着補強用のシー

トに適しているものと考えられる。従って、AFRP シートと鋼板の接着特性や付着性能向上方法を検討することにより、既設 RC 構造物のより効果的な補強工法を提案できるものと考えられる。

このような観点より、本研究では、AFRP シートと鋼板との付着性能に及ぼす鋼板表面の処理方法の影響を検討することを目的に、AFRP シートをエポキシ系含浸接着樹脂を用いて含浸・硬化させて板状化した AFRP シートとブラスト処理の有無およびその処理深さを変化させた鋼板のせん断付着試験を行った。また、せん断付着試験の結果を参考にして、緊張接着補強用 AFRP シートへの導入緊張率の決定を行い、緊張接着補強用 AFRP シート定着部にブラスト処理を施した鋼板を用いた AFRP シート緊張接着補強工法への適用性を RC 梁を用いて実験的に検討した。

2. せん断付着試験概要

2.1 試験体概要

表-1 には、せん断付着試験に用いた試験体の一覧を示している。表中、試験体名の第 1 項目は、鋼板表面の処

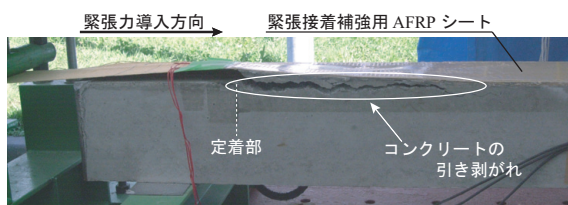


写真-1 緊張力導入時における引き剥がれ状況

表-1 せん断付着試験試験体一覧

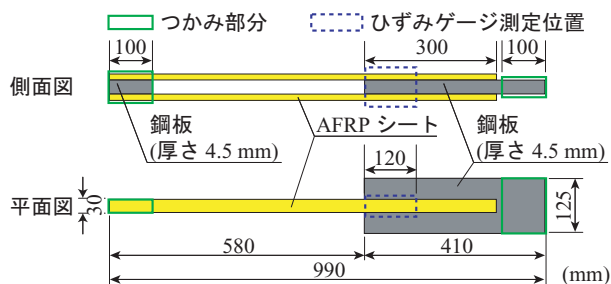
試験体名	表面処理	備考
N-1	なし	—
N-2		—
N-3-S		片面接着
BL-1	浅いブラスト	—
BL-2		—
BH-1	深いブラスト	—
BH-2		—
BH-3		—
BH-4-S		片面接着

*1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程 建築社会基盤系専攻 (正会員)

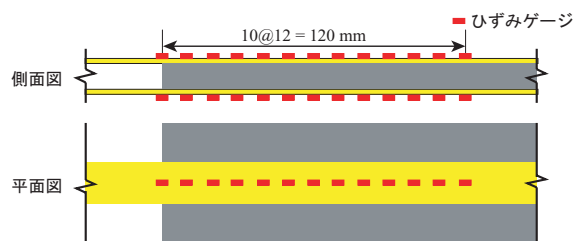
*2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 技術開発センター 副センター長 博(工) (正会員)

*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)



図－１ せん断付着試験用試験体概要図



図－２ 軸方向ひずみゲージ測定位置の一例



写真－２ 実験状況

理の有無を示しており、Nはブラスト処理を施していないケース、Bはブラスト処理を施したケースを示している。Bに付随する英文字はブラスト処理深さ（L：浅いブラスト、H：深いブラスト）を示している。第2項目は、同一試験体の場合の通し番号、第3項目のSは片側のみの接着であることを示している。

図－1には、本実験で用いた試験体の概要を示している。AFRPシートには、保証耐力1,176 kN/mのものを、その平面寸法は30×880 mmとした。AFRPシートは予めエポキシ系プライマーを塗布した鋼板の片面もしくは両面に接着し、その接着範囲は30×300 mmとした。なお、AFRPシートの板状化（硬化・整形）およびAFRPシートの接着には汎用のエポキシ系含浸接着樹脂を用いた。なお、3章以降の考察では、エポキシ系プライマーとエポキシ系含浸接着樹脂を総称して接着樹脂と呼ぶこととしている。鋼板には、厚さ4.5 mmのSS400材を用い、その平

表－２ AFRPシートの力学的特性値（公称値）

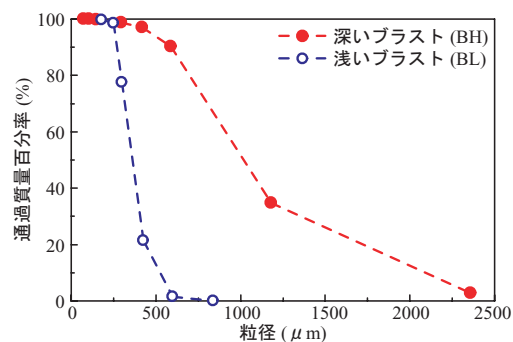
目付量 (g/m ²)	保証 耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張 強度 (GPa)	弾性 係数 (GPa)	破断 ひずみ (%)
830	1,176	0.572	2.06	118	1.75

表－３ 接着樹脂の力学的特性値（公称値）

項目	曲げ強度	圧縮強度	引張せん断強度
物性値	40 MPa	35 MPa	10 MPa
試験方法	JIS K-6911	JIS K-6911	JIS K-6850

表－４ 研磨材化学成分

	化学成分 (%)						
	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	その他
BL	33.3	34.7	4.5	19.8	6.6	0.8	0.3
BH	45～55	30～36	2～7	3～6	0～1	—	—



図－３ 研磨材の粒径加積曲線

表－５ ブラスト処理面の深さ

	平均深さ (μm)	最大深さ (μm)
BL	34.70	45.78
BH	42.55	63.37

面寸法は125×410 mmとした。万能試験機に設置する際のつかみ部分の長さは100 mmとした。なお、AFRPシート側のつかみ部分においては、AFRPシートと鋼板が平行になるように厚さ4.5 mmのSS400材を配置している。

図－2には、軸方向ひずみの測定位置を示している。用いたひずみゲージの検長や測定間隔は実験ケースにより異なるが、それぞれ2～10 mmおよび10～25 mmである。

表－2および表－3には、それぞれAFRPシートと接着樹脂の力学的特性値を示している。また、表－4および図－3には、各ブラスト処理に用いた研磨材の化学成分および粒径加積曲線を示している。ブラスト処理は、これらの研磨材を圧縮空気を用いて鋼板に垂直に300 kg/cm²程度の圧力で打ちつける方法で実施した。これは、後述するRC梁の緊張接着補強用AFRPシート定着部に埋設されている鋼板についても同様である。なお、表－5には各ブラスト処理における処理深さの測定結果を示している。

2.2 実験概要

写真－2には、せん断付着試験の実験状況を示してい

表－6 せん断付着試験結果一覧

試験体名	最大引張荷重 (kN)	AFRP シートの剥離・破壊性状	
		A 面	B 面
N-1	21.5	鋼板と接着樹脂界面にて剥離	鋼板と接着樹脂界面にて剥離
N-2	30.7	鋼板と接着樹脂界面にて剥離	鋼板と接着樹脂界面にて剥離
N-3-S	25.2	鋼板と接着樹脂界面にて剥離	—
BL-1	47.2	鋼板と接着樹脂界面にて剥離	接着樹脂の凝集破壊
BL-2	42.0	接着樹脂の凝集破壊	変化なし
BH-1	61.2	鋼板と接着樹脂界面にて部分剥離後、破断	接着樹脂の凝集破壊
BH-2	35.7	鋼板と接着樹脂界面にて剥離	接着樹脂と AFRP シート界面にて剥離
BH-3	48.9	変化なし	接着樹脂の凝集破壊
BH-4-S	55.6	接着樹脂の凝集破壊後、破断	—

る。本実験は、容量 1,000 kN の万能試験機を用いて、毎秒 0.1 kN 程度の载荷速度で実施した。

測定項目は、引張荷重および AFRP シートの軸方向ひずみである。これらのデータは、デジタルメモリレコーダを用いて、サンプリング周期 10 Hz で一括収録している。また、実験時には、AFRP シートの剥離および破断状況を連続的に撮影し、実験終了後には、AFRP シートの剥離・破壊性状を観察した。

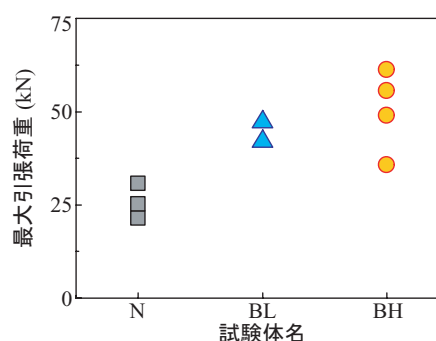
3. 実験結果および考察

3.1 最大引張荷重

図－4 には、各試験体の最大引張荷重を表面処理方法ごとに整理して示している。また、表－6 には、各試験体の最大引張荷重および AFRP シートの破壊性状を示している。なお、片面接着の N-3-S、B-4-S 試験体は、他の試験体との比較を容易にするため、便宜的にその値を 2 倍にして示し、シート接着面を A 面として整理している。

図－4 より、最大引張荷重は、表面処理なし (N)、浅いブラスト処理 (BL)、深いブラスト処理 (BH) の順に大きくなる傾向にあることが分かる。これらのことから、鋼板表面にブラスト処理を施すことにより、AFRP シートとの付着性能が向上することや、その効果はブラスト処理深さが深い場合ほど大きいことが明らかになった。ただし、深いブラスト処理を施す場合においては、実験結果に比較的大きなばらつきがあることから、今後さらに実験データを蓄積する必要があるものと考えられる。

また、表－6 を見ると、ブラスト処理を施していない N 試験体の場合には、最大引張荷重が 20～30 kN 程度であり、いずれも鋼板と接着樹脂の界面にて剥離していることが分かる。一方、ブラスト処理を施した BL、BH 試験体の場合には、BH-2 試験体を除き、いずれも最大引張荷重が 40 kN 以上であり、かつ A もしくは B 面に接着樹脂の凝集破壊が生じている。これに対し、BH-2 試験体は



図－4 最大引張荷重

最大引張荷重が 40 kN 以下であり、かつ鋼板と接着樹脂界面もしくは接着樹脂と AFRP シート界面にて剥離している。これらのことから、最大引張荷重が 40 kN 以下の場合には鋼板と接着樹脂界面もしくは接着樹脂と AFRP シート界面での剥離、40 kN 以上の場合には接着樹脂の凝集破壊に至っていることが明らかになった。

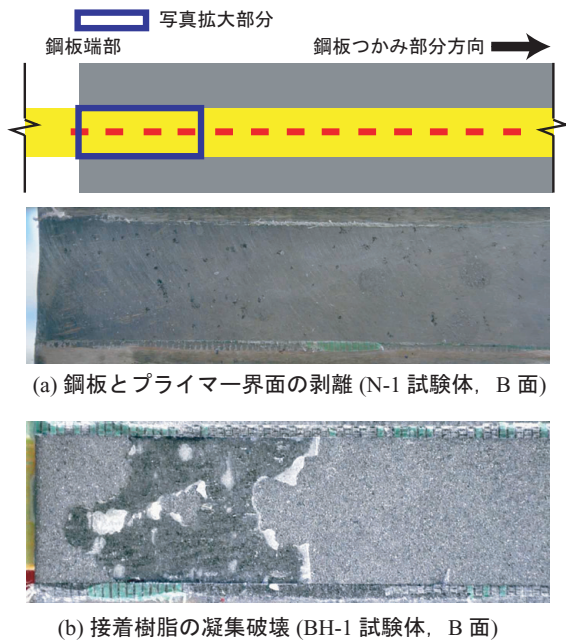
3.2 接着界面の破壊性状

写真－3 には、実験終了後の鋼板の表面性状の一例を (a) 鋼板と接着樹脂の界面剥離、(b) 接着樹脂の凝集破壊、の場合について示している。写真より、界面剥離の場合には、AFRP シートが接着樹脂とともに完全に剥離していることが分かる。また、接着樹脂の凝集破壊の場合には、鋼板表面に接着樹脂が部分的に残留しており、接着樹脂部分が破壊して部分剥離に至ったことが分かる。

これらのことから、ブラスト処理を施すことにより、鋼板表面と接着樹脂の付着性能が向上していることが視覚的に分かる。

3.3 AFRP シートのひずみ分布性状

図－5 には、各荷重時における AFRP シートのひずみ分布性状の一例を N-1、BL-1 および BH-1 試験体について示している。なお、これらの試験体はいずれも鋼板の両面に AFRP シートを接着していることより、両面の結果



について示している。また、太線は各試験体の最大引張荷重におけるひずみ分布を示している。

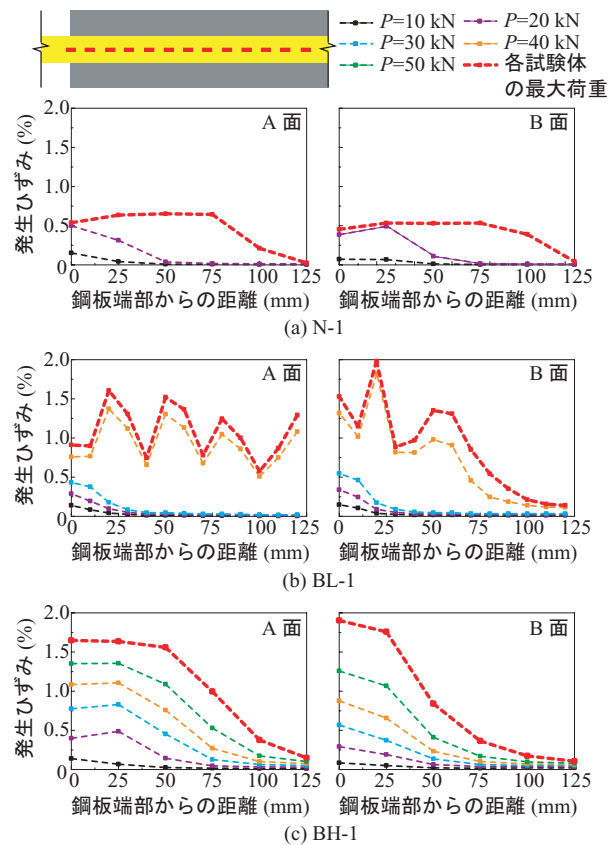
図より、いずれの場合においても引張荷重の増大に伴って鋼板端部の発生ひずみが大きくなる傾向にあることが分かる。ブラスト処理を施していない N-1 試験体では最大荷重時における最大発生ひずみは、5,000 μ 程度である。浅いブラスト処理を施した BL-1 試験体では、最大荷重時においてひずみ分布が 0.5 ~ 1.5 % の範囲で変動している。これは、AFRP シートが大きな音とともに急激に剥離したことにより損傷したためと推察される。

深いブラスト処理を施した BH-1 試験体では、各荷重時におけるひずみ勾配がほぼ一定であることから、最大荷重時まで部分剥離が発生せずに AFRP シートと鋼板がほぼ一体となっていたことが分かる。また、最大荷重時における最大ひずみは 20,000 μ 程度である。これらのことから、深いブラスト処理の場合において、最も高い付着性能を示していることが分かる。

ここで、BL-1 試験体の A 面を除き、いずれの場合も最大荷重時におけるひずみは、鋼板端部から 125 mm 程度の位置においてほぼ零となっている。いま、鋼板端部から 125 mm の位置までの範囲において付着力が発揮されているものと仮定し、両端のひずみ差 $\Delta\varepsilon$ から平均せん断付着応力 τ を式 (1) により試算する。

$$\tau = \frac{\Delta\varepsilon \times E \times t}{l} \quad (1)$$

ここに、 τ : 平均せん断付着応力 (MPa), $\Delta\varepsilon$: 鋼板端部から 125 mm 間におけるひずみ差 (μ), E : AFRP シートの弾性係数 (N/mm²), t : AFRP シートの厚さ (mm), l : 有効付着長 (mm) (= 125 mm) である。計算の結果、平均せん断



付着応力 τ は、N-1, BL-1, BH-1 試験体 (いずれも B 面) においてそれぞれ 2.2, 7.5, 9.7 MPa となる。従って、鋼板にブラスト処理を施すことにより、AFRP シートとの付着性能が向上していることが分かる。

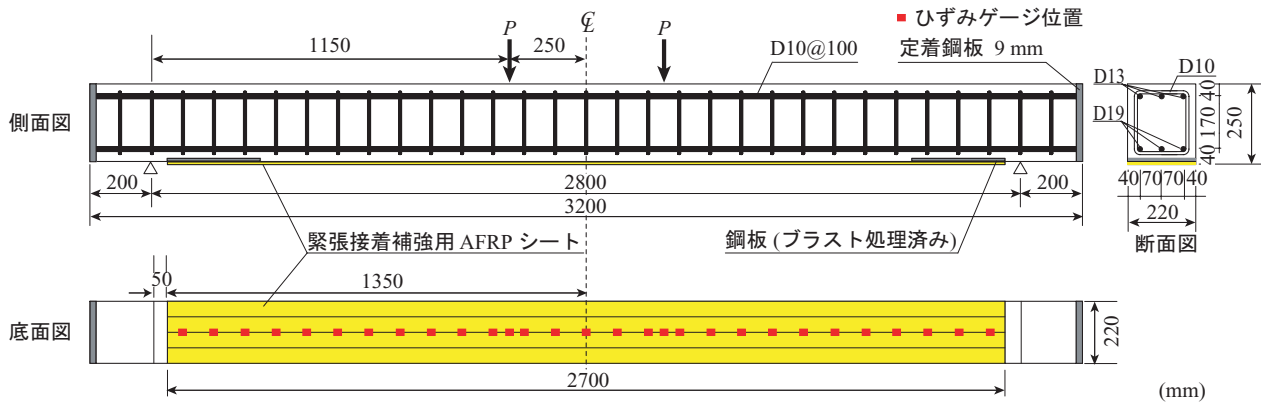
また、表-3 に示したように接着樹脂の引張せん断強度が 10 MPa 程度であることから、平均せん断付着応力 τ が大きい BL/BH-1 試験体においては接着樹脂の凝集破壊を生じる傾向が強く現れるものと推察される。

4. RC 梁の AFRP シート緊張接着補強工法への適用

前章までの検討では、鋼板にブラスト処理を施すことにより、AFRP シートとの付着性能を向上可能であることを明らかにした。本章では、AFRP シート緊張接着補強工法により RC 梁を曲げ補強する場合において、緊張接着補強用 AFRP シート定着部にブラスト処理を施した鋼板を用いる場合の適用性について述べる。

4.1 補強概要

図-6 には、試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要を示している。用いた試験体は、断面寸法 220 × 250 mm, 純スパン長 2.8 m の複鉄筋 RC 梁であり、梁下面の支点部近傍には、緊張接着補強用 AFRP シートを定着させるための鋼板が埋設されている。なお、鋼板の表面には、浅いブラスト処理を施している。これは、コンクリート表面にブラスト処理を行った際に、鋼板のブラスト処



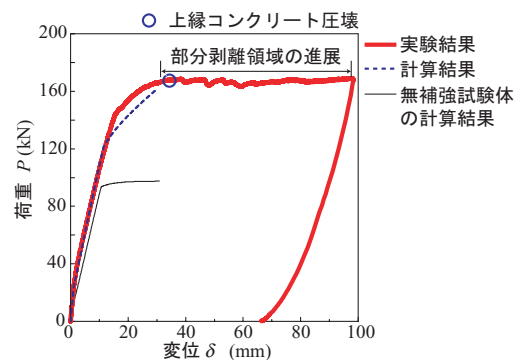
図－6 試験体概要図

表－7 使用材料の特性値一覧

項目	単位	特性値
コンクリート圧縮強度	MPa	34.4
軸方向鉄筋の降伏強度	MPa	349
AFRPシートの保証耐力	kN/m	1,176
AFRPシートの引張強度	GPa	2.06
AFRPシートの弾性係数	GPa	118
AFRPシートの導入緊張率*	%	17.5 (45.4)**

* AFRPシートの保証耐力に対する導入緊張力の割合

** ()内は導入緊張力 (kN)



図－7 荷重－変位関係

理も同様に行ったためである。

緊張接着補強用 AFRP シートの接着は、1) 予め樹脂を含浸・硬化させて板状の AFRP シートを製作し、2) AFRP シートを接着するコンクリートおよび鋼板表面にブラスト処理を施した後、エポキシ系プライマーを塗布し、3) AFRP シートを油圧ジャッキにより所定の緊張力を与えた状態で RC 梁に接着し、接着樹脂の硬化に必要な 7 日間程度の養生期間が経過した後、4) AFRP シートに与えた緊張力を解放して、RC 梁にプレストレスを導入する形で実施した。その他の詳細な緊張接着作業工程については文献⁴⁾を参照されたい。上記の 4) の工程において、両端部の AFRP シートと鋼板の界面には大きなせん断付着応力が発生するが、剥離などの大きな変状は見られず、両者の付着は十分に確保されていることを打音検査により確認した。

表－7 には、使用材料の特性値を一覧にして示している。

測定項目は、載荷荷重、スパン中央点変位（以後、変位）および緊張接着補強用 AFRP シート各点の軸方向ひずみである。また、実験時には、RC 梁のひび割れや AFRP シートの剥離状況を連続的に撮影している。

4.2 実験結果

(1) 荷重－変位関係

図－7 には、載荷荷重と変位に関する実験結果を計算結果と比較して示している。また、無補強試験体の場合の計算結果も示している。計算結果は、土木学会コンク

リート標準示方書⁵⁾に準拠して、コンクリートと AFRP シートの完全付着を仮定して断面分割法により算出した。その他の詳細な断面分割法の解析条件および材料モデルは文献⁶⁾を参照されたい。

図より、提案の AFRP シート緊張接着補強工法により RC 梁の曲げ耐力を大幅に向上可能であることが分かる。また、実験結果は、計算終局時まで計算結果とよく対応していることから、AFRP シートはコンクリートとほぼ完全に付着しているものと推察される。

(2) ひび割れ性状

写真－4 には、終局時近傍におけるひび割れ性状を示している。実験では、RC 梁の上縁コンクリート圧壊後、下縁コンクリートに発生した斜めひび割れの先端部が AFRP シートを押し下げて引き剥がすピーリング作用による AFRP シートの部分剥離が発生し、その後、変形量の増大に伴って部分剥離範囲が載荷点近傍から支点部近傍まで進展した。しかしながら、写真に示しているように鋼板埋設部分において、AFRP シートの部分剥離の進展が抑制された。また、実験終了後、緊張接着補強用 AFRP シートは鋼板と強固に接着されていることを打音検査などで確認している。

このことより、鋼板にブラスト処理を施すことにより、AFRP シートに緊張力が導入されている場合においても十分な定着性能を期待できることが明らかになった。

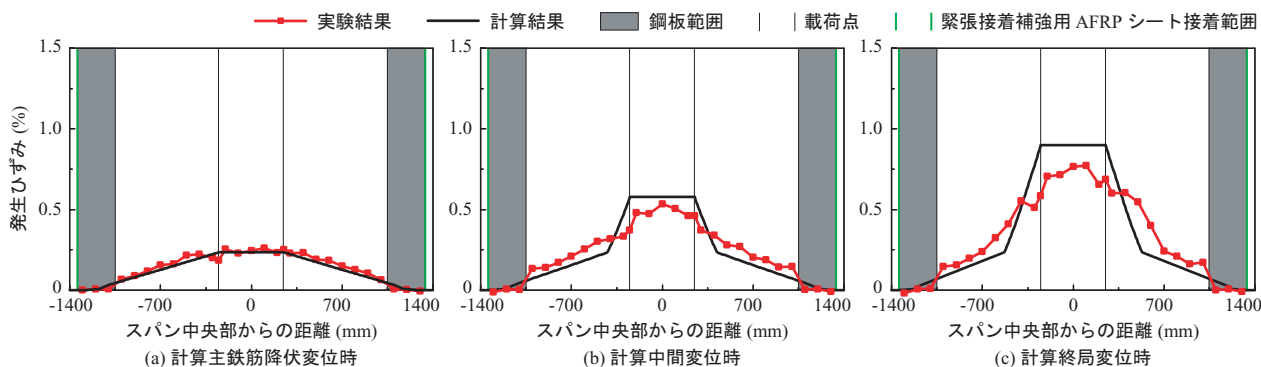


図-8 各計算変位時における軸方向ひずみ分布



写真-4 終局時近傍におけるひび割れ性状

(3) ひずみ分布性状

図-8には、各計算変位時における軸方向ひずみ分布性状に関する実験結果と計算結果の比較を示している。計算結果は、AFRPシートとコンクリートの完全付着を仮定した断面分割法に基づいて算出している。ここで、計算中間変位時とは、計算主鉄筋降伏変位時と計算終局変位時における中間の変位時のことである。なお、各ひずみは荷重載荷実験に伴って発生した増分ひずみであり、緊張接着時におけるひずみは含まれていない。

図より、計算主鉄筋降伏変位時および計算中間変位時までは、実験結果と計算結果がほぼ対応していることが分かる。従って、荷重初期から計算中間変位時近傍まではAFRPシートとコンクリートの付着が確保されていると考えられる。また、各変位時において鋼板範囲に発生するひずみが非常に小さいことから、定着が確保されていることが分かる。

しかしながら、計算終局変位時には、ひずみ分布が等曲げ区間においては $2,000\mu$ 程度計算結果を下回り、等せん断区間においては実験結果が計算結果を上回っている部分が見られ、計算結果とは多少異なる性状を示している。これは、前述したように、ピーリング作用によりAFRPシートが部分剥離したことによるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、AFRPシートと鋼板への付着性能に及ぼすブラスト処理の影響を検討することを目的に、ブラスト処理の有無やその処理深さを変化させた鋼板とAFRPシー

トのせん断付着試験を行った。また、せん断付着試験の結果を参考にして、緊張接着補強用AFRPシート定着部にブラスト処理済み鋼板を用いたAFRPシート緊張接着補強工法への適用性をRC梁を用いて実験的に検討した。

その結果、鋼板にブラスト処理を施すことによりAFRPシートとの付着性能が向上することや、その効果は処理深さが深いほど大きいことが明らかになった。また、AFRPシート緊張接着補強工法によりRC梁を曲げ補強する場合において、ブラスト処理を施した鋼板を緊張接着補強用AFRPシート定着部に埋設することで、緊張接着補強用AFRPシートの定着を十分に確保できることが明らかになった。

なお、本研究ではAFRPシートへの導入緊張力が比較的低い場合の曲げ補強効果に着目して検討を行っているが、今後はより高い緊張力を導入した場合に関する提案工法の適用性について検討する必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 姜 威, 中村一史, 鈴木博之, 前田研一, 入部孝夫: CFRP板と鋼板の接着特性に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol.14, 2006.
- 2) 山田 稔, 尾崎 潤, 石井光浩, 長嶋文雄: 炭素繊維補強材の接着強度とモデル化に関する検討, 鋼構造年次論文報告集, Vol.14, 2006.
- 3) 土木学会: FRP接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端, 2012.
- 4) 澤田純之, 岸 徳光, 三上 浩, 藤田 学: AFRPシート緊張接着によるRC梁の曲げ補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, pp.1543-1548, 2008.
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), 2007.
- 6) N.Kishi, Y.Kurihashi and H.Mikami: Load-Carrying Behavior of Pre-Cracked RC Beams Reinforced with Pretensioned AFRP Sheet, Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CD-ROM09-192, 2012.